

单波段单极化 SAR 图像水体和居民地 信息提取方法研究

胡德勇^{1,2)} 李京¹⁾ 陈云浩¹⁾ 蒋卫国¹⁾

¹⁾ (地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

²⁾ (三维信息获取与应用教育部重点实验室, 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100037)

摘要 SAR 图像上水体和居民地信息的提取在实际应用中具有重要的意义。为了更好地提取 SAR 图像上水体和居民地, 以单波段单极化 Radarsat-1 SAR 图像为研究对象, 首先利用半变异函数分析样本图像的结构特性来确定纹理信息提取的最佳参数; 然后, 在此基础上基于灰度共生矩阵计算 SAR 图像均值、角二阶矩和熵 3 种纹理测度, 建立了适于图像分类的多维特征空间, 从而有效地增强了水体和居民地信息; 最后通过样本采集, 使用支持向量机分类器进行水体和居民地信息提取, 并采用近期归一化植被指数 (NDVI) 数据和分类结果进行目标层融合来消除山体因素的影响, 信息提取的结果显示, 分类总体精度为 82.57%, Kappa 系数为 0.58 较准确地提取了水体和居民地信息。

关键词 合成孔径雷达 半变异函数图 灰度共生矩阵 支持向量机

中图法分类号: TP722.6 TP751 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)02-0257-07

Water and Settlement Area Extraction from Single-band Single-polarization SAR Images Based on SVM Method

HU De-yong^{1,2)}, LI Jing¹⁾, CHEN Yun-hao¹⁾, JIANG Wei-guo¹⁾

¹⁾ (State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875)

²⁾ (Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application of Ministry of Education, College of Resource Environment & Tourism, Capital Normal University, Beijing 100037)

Abstract It is very important to extract water and settlement areas from SAR images in practical applications. In this paper the single band and single-polarization Radarsat-1 SAR image is used to water and settlement area extraction. Firstly, the statistic structure information of sample image is analyzed using semivariogram to determine the optimum parameters for textural information extraction. In order to establish the multidimension feature space for image classification, the textural measures such as mean, angle second moment and entropy have been calculated based on grey level co-occurrence matrix method. Then the water and settlement area information can be enhanced effectively using false color composite method. Three types of sample such as water, settlement and other are collected as training samples, and the image data are processed using support vector machine classification method. Finally, the image fusion on the target level between classification result image and NDVI image is conducted in order to eliminate the mountain influence, and the water and settlement areas are extracted accurately with a total classification accuracy of 82.57%, and Kappa coefficient of 0.58.

Keywords synthetic aperture radar (SAR), semivariogram, grey level co-occurrence matrix, support vector machine (SVM)

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40671130)

收稿日期: 2006-08-30 改回日期: 2006-11-06

第一作者简介: 胡德勇 (1974~), 男, 博士。主要从事遥感与 GIS 在资源环境、自然灾害等领域的应用研究。Email: deyonghu@ires.cn

通讯作者: 李京, Email: lijing@ires.cn

1 引言

众所周知,水体和居民地信息在洪水灾害管理、环境监测及城市规划等领域具有重要的意义,如何快速有效获取这些信息,已成为人们关注的问题,但是有时往往受到观测条件限制,不能实时获得这些信息。雷达遥感由于可以全天时、全天候对地观测,具有传统光学遥感无法比拟的优点,因此其应用日益受到人们的重视。

由于地表结构复杂、地表形态多样,加上合成孔径雷达(SAR)成像原理和光学遥感有很大不同,致使雷达图像上亮度值相同的像元并不完全对应着地表同类地物,因此用基于单个像元的传统方法来提取 SAR 图像信息,受到了很大的限制^[1]。Radarsat-1 SAR 图像具有单波段、单极化特点,因此单凭它进行信息提取存在很多不足。但是由于 SAR 图像亮度范围较大,且含有较丰富的纹理结构信息,因此可以辅助原图像进行分类,以提高分类精度^[2]。纹理信息提取的窗口大小、空间距离和方向等参数对信息提取结果存在一定影响,是纹理分析研究较多的内容^[3]。许多学者在 SAR 图像信息提取方面进行过研究,例如,辅以纹理信息对居民地分类精度有明显的提高^[4];用纹理图像亮度阈值分割法提取居民地可以获得 70% 以上的正确识别率^[5];采用纹理信息复合的模糊 C 均值聚类算法进行自动分类等^[6]。另外,还有基于神经网络^[7-10]、模糊理论^[11]等方法在 SAR 图像分类中也得到了应用。SAR 图像水体和居民地的信息提取,由于受到地面特性、图像斑点噪声和分类算法等影响,目前大多采用阈值分割或者监督分类方法,因此精度难以保证,对于类似居民地的具有复杂结构的地物信息的提取方法还值得探讨。

本文选择 Radarsat-1 SAR 图像,并基于灰度共生矩阵进行了纹理结构信息的提取,首先有效地增强了 SAR 图像,然后在此基础上进行样本采集,并使用支持向量机(SVM)进行专题信息提取,以探讨单波段、单极化 SAR 图像水体和居民地信息的快速提取方法。

2 研究数据和方法

2.1 数据

在本研究中,试验区数据为 2004 年 7 月 10 日

Radarsat-1 的 ScanSAR Narrow (SNB) 降轨数据,入射角约 $39^{\circ} \sim 42^{\circ}$,图像采样后的地面分辨率为 25m。从整景图像中裁减 1405×1412 pixels 大小的区域作为研究区,范围为 $112^{\circ}46'50'' \sim 113^{\circ}8'40''E$, $28^{\circ}3'7'' \sim 28^{\circ}21'55''N$,覆盖湖南省长沙市及其郊县地区(如图 1 所示)。该区地貌以丘陵为主,湘江自南向北贯穿整个研究区,在研究区东北、西南方向存在部分地势起伏较大地区。植被覆盖为亚热带常绿阔叶林和落叶林,主要土地利用类型为居民地、耕地、园地、林地、交通用地等。另外,为了验证 SAR 图像分类的结果,还收集到了覆盖研究区近期的 Landsat ETM+ 数据两景。

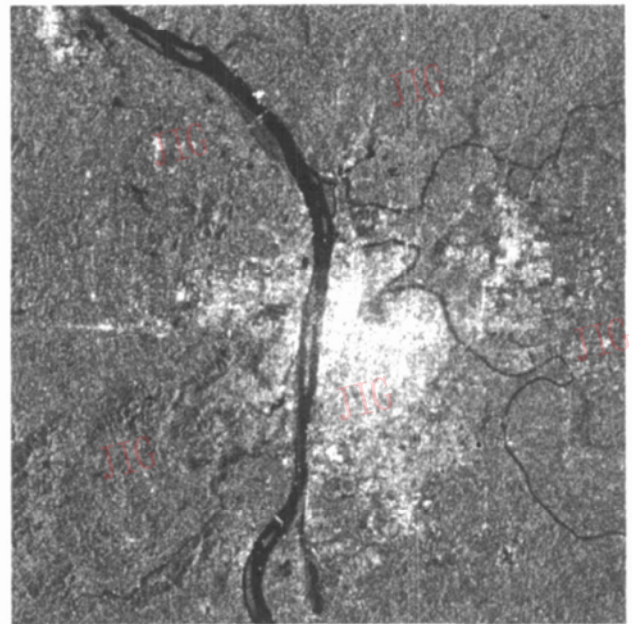


图 1 研究区 Radarsat-1 的 ScanSAR 图像

Fig 1 The Radarsat-1 ScanSAR image of the study area

2.2 处理流程

从 SAR 图像上提取水体和居民地的处理流程是:首先对 SAR 图像进行 Gamma (3×3) 滤波,同时通过半变异函数分析来分析图像的结构特征,并在此基础上提取纹理信息;然后使用 SVM 来进行图像分类,以获取水体和居民地信息。考虑到山体等因素的干扰,可通过对分类后的数据和从 ETM+ 图像提取的归一化植被指数(NDVI)数据进行目标级融合来减少错分、误分,以提高分类精度;最后是结果对比和精度评价(如图 2 所示)。

3 数据处理和结果分析

3.1 水体和居民地的微波遥感机理

众所周知,雷达图像的亮度值代表雷达回波强

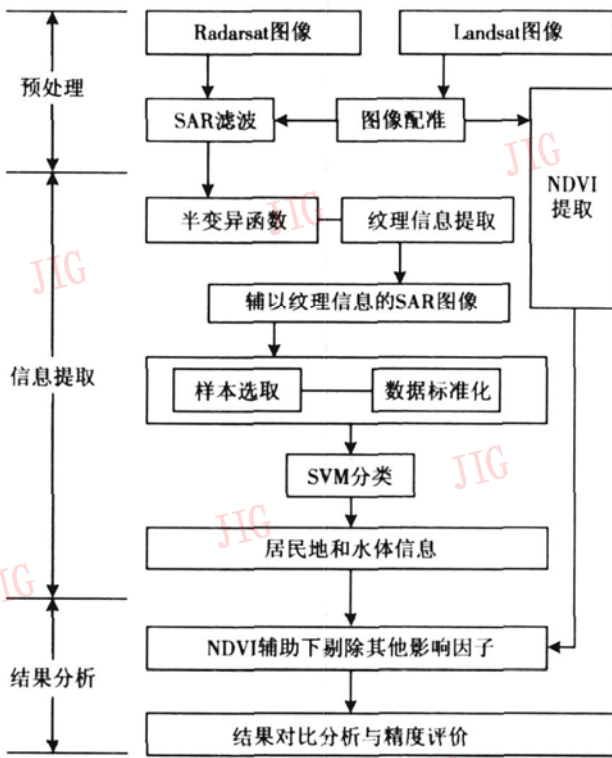


图 2 纹理复合的 SAR 图像信息提取及精度评价流程图

Fig 2 Procedure of SAR images information extraction and accuracy evaluation based on textural analysis

度的大小,它定量地由雷达后向散射系数决定,而雷达系统和地物目标都影响后向散射系数值大小。对于特定的波长、入射角和极化方式的雷达系统而言,影像特征主要取决于不同的地物目标。在 SAR 图像上高密度居民地一般呈现较亮色调,而在低密度居民地的亮色调之间则夹杂一些暗色调,其主要由居民地内的镜面反射、漫反射、各向同性散射,以及其角反射和谐振效应等的强度和空间配置决定^[12];由于水体对 Radarsat-1 SAR 的波长而言,属于光滑表面,因而在图像上呈暗色或黑色,且色调较为均一。居民地和水体具有不同的纹理特征,在进行 SAR 图像信息提取时,可以通过加入它们的纹理特性来增强水体和居民地专题信息。

3.2 纹理测度算法

纹理测度算法可分为以下两类^[4]:一类是结构分析方法,它主要是提取纹理基元,从结构组成上探索纹理的规律;另一类是统计分析方法,它主要是从图像有关属性的统计分析出发来计算纹理特征,其在目前的纹理测度中占有重要的地位,灰度共生矩阵法 (grey level co-occurrence matrix, GLCM) 就是其中常用的方法之一^[13]。它是一种基于图像灰度联合概率矩阵的方法,即它是通过计算图像邻近像元

灰度级之间的二阶联合条件概率密度 $P(i, j | \delta, \theta)$ 来表示纹理, $P(i, j | \delta, \theta)$ 表示在给定的空间距离 δ 和方向 θ 上,以灰度级 i 为起始点出现灰度级 j 的概率。对于具有 N 级灰度的图像,其灰度共生矩阵 P 可以表示为

$$P = \{P_k(i, j | \delta, \theta)\}_{N \times N} \quad (1)$$

式中, N 表示图像的灰度级数, K 为像元顺序号。

由灰度共生矩阵 P 可以生成多种统计值作为纹理特征的度量。由于居民地在 SAR 图像上的表征总体上呈现亮色调,而水体呈现暗色调,因此根据水体和居民地的纹理特性,选择均值 (MEA)、熵 (ENT)、角二阶矩 (ASM) 等^[14] 纹理测度都可以在 SAR 图像上将水体、居民地和其他信息区别开来,其中

$$MEA = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N i \times P(i, j) \quad (2)$$

$$ENT = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N -P(i, j) \times \ln P(i, j) \quad (3)$$

$$ASM = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (P(i, j))^2 \quad (4)$$

式 (2) ~ 式 (4) 中, $P(i, j)$ 为灰度共生矩阵的元素, N 为矩阵的大小。实际应用中,常常通过计算窗口 w (大小为 $n \times n$ pixels) 的灰度共生矩阵来得到 w 的中心像元的纹理测度值 $T_{(x, y)}$ 。对于 SAR 图像的每个像素 (x, y) ,先分别计算其周围窗口 w 内的 $T_{(x, y)}$ 的值 (包括 MEA、ENT、ASM 的值),然后在图像上移动窗口 w ,最后就可以生成纹理特征图像。它们先和 SAR 图像的灰度值组成多维空间,然后通过假彩色合成来有效地增强单波段、单极化 Radarsat-1 SAR 影像的专题信息。

3.3 半变异函数分析与纹理信息提取

显而易见, $T_{(x, y)}$ 是 δ, θ, w 等 3 个变量的函数,其中用于不同图像最佳纹理特征计算的参数是不同的,这是纹理信息提取值得探讨的方面。由于半变异函数能够反映 SAR 图像数据的随机性和结构性,且地物在图像上也表现出很好的空间自相关性和纹理特征^[15],所以影响 $T_{(x, y)}$ 的因素 δ, θ, w 可以通过研究区样本的半变异函数 γ 的大小来分析,本文选择 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 等 4 个方向来讨论半变异函数,其定义分别为

东西方向 ($\theta = 0^\circ$):

$$\gamma_1 = 1/2m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [Z(i, j) - Z(i, j + \delta)]^2 \quad (5)$$

东北-西南方向 ($\theta = 45^\circ$):

$$y_2 = 1/2m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [Z(i, j + \delta) - Z(i + \delta, j)]^2 \quad (6)$$

南北方向 ($\theta = 90^\circ$):

$$y_3 = 1/2m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [Z(i, j) - Z(i + \delta, j)]^2 \quad (7)$$

东南-西北方向 ($\theta = 135^\circ$):

$$y_4 = 1/2m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [Z(i, j) - Z(i + \delta, j + \delta)]^2 \quad (8)$$

式(5)~式(8)中, δ 表示距离, n 表示样本图像大小, $Z(i, j)$ 为像素 (i, j) 的灰度值, m 是计算的数据对数目, 它取决于计算的方向和间距。为增强具有复杂结构特性的居民地信息, 可先在图像上随机采集城镇居民地样本, 然后分析样本的不同方向 ($\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$)半变异函数分布情况(如图3所示)。

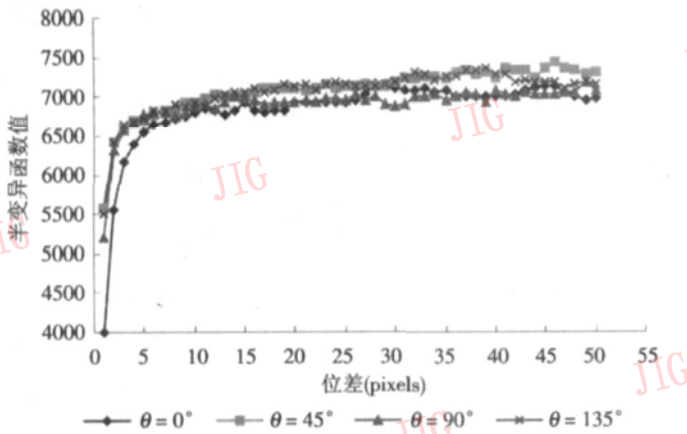


图 3 研究区城镇居民地样本的不同方向半变异函数图
Fig 3 Semivariogram of urban land sample in different directions

从图3可以看出, 不仅 SAR 图像上的城镇居民地具有结构性, 并且不同方向的结构不一致, 即具有方向性。 y_2, y_4 基台值 (sill) 要高出 y_1 和 y_3 , 且 y_2 和 y_4 的变程 (range) 基本吻合, 均约在 6pixels 左右, 这说明样本在该窗口范围内的空间依赖性即达到显著。虽然 y_2, y_4 在 40pixels 左右有个峰值出现, 但是由于窗口太大会将不同纹理性质均匀化, 且将导致纹理信息的平滑^[12], 不适合作为纹理提取窗口, 因此纹理信息提取的窗口大小选择为 6×6 pixels, $\delta = 1, \theta = 135^\circ$, 提取像素 (x, y) 周围 6×6 大小的范围内的 3 个纹理测度 $T_{(x, y)}$, 它和 SAR 图像灰度值一起构成了 4 维空间。

朱彩英曾经提出使用均值、方差、对比度等 3 个纹理特征来区分星载 SAR 图像上的居民地与其他地物^[5]; 杨存建提出将原始波段赋以红色, 反差分

纹理波段赋以绿色, 角二阶矩纹理波段赋以蓝色, 用来进行假彩色合成, 可以有效地增强居民地专题信息^[1]。本文选择角二阶矩、均值和熵, 分别赋为 R, G, B 进行假彩色合成, 这样在假彩色合成图像上, 水体显示为红色, 居民地为黄色, 其他为蓝色(如图 5(a)所示), 这就可以有效地增强水体和居民地信息。

3.4 水体和居民地信息提取

专题信息提取可以采用图像分类来实现。目前分类算法较多, 其中最大似然法分类方法 (maximum likelihood classification method, MLC) 是较为常用的分类器, 它假设数据的分布形式是已知的, 样本是相互独立的, 但当总体分布不符合正态分布时, 其分类可靠性将下降^[16]。

SVM 是基于 Vapnik-Chervonenkis 理论的创造性机器学习方法^[17], 它是根据 Vapnik 的结构风险最小化原则, 尽量提高学习机的泛化能力, 以便由有限的训练集样本得到的小误差能够保证对独立的测试集仍保持小的误差。对于非线性分类, SVM 可通过非线性映射将样本空间转换到高维特征空间来进行线性转换, 在特征空间中引入不敏感损失函数 ξ 并通过定义最优线性回归超平面, 把寻找最优线性回归超平面的算法归结为求解一个凸约束条件下的凸规划问题, 并可以求得全局最优解^[18]。SVM 图像分类主要步骤包括样本采集、参数设置、样本集训练和应用预测模型进行图像分类等(图 4)。

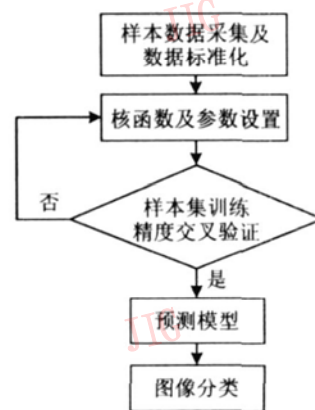


图 4 SVM 图像分类流程图

Fig 4 Procedure of image classification based on SVM

对于 SAR 图像来说, 由于其成像机理的复杂性, 加上斑点噪声影响, 致使 MLC 分类器在图像分类的时候还存在很多不足, SVM 由于适合解决本质上的非线性问题, 因此适合 SAR 图像信息提取^[19-21]。本文选择 SVM 分类器进行图像分类。分

类时,首先通过研究区的样本数据采集,获取居民地、水体和其他类型的样本,其中居民地的样本数量为 59 370 pixels 约占总体的 2.99%,水体的样本数量为 15 147 pixels 约占总体的 0.76%,其他类型为 148 000 pixels 约占总体的 7.46%。为消除不同属性数据差别很大造成的对分类结果的影响,在进行 SVM 分类前需要先进行数据标准化,其主要包括以下两个阶段:首先对训练数据进行标准化,在本研究中通过将数据标准化到 -1 到 1 之间来生成标准化模型;然后根据标准化模型来标准化用于分类的图像数据,整个 SVM 分类在 Libsvm 软件中进行^[22]。

为了对 SVM 和 MLC 分类结果进行横向对比,本文使用相同样本对纹理复合的 SAR 图像进行分类,结果见图 5(b)、图 5(c)。从图像定性分析角度可以看出, SVM 分类结果要优于 MLC 分类法,且“椒盐 (pepper and salt) 现象”明显要少。

平静的水面总是造成 SAR 图像镜面反射,在图像上呈黑色调,但是在地形起伏较大的地区,由于雷达阴影存在,对水体信息提取具有一定的干扰。考虑到研究区的具体情况,山地地区的植被覆盖较好,可以通过辅助 NDVI 数据来修正水体信息,即对 SVM 分类图像和 NDVI 数据进行目标级融合,以消除山地阴影的影响,目标层融合的准则为

$$R = W(NDVI < 0) + S + O \quad (9)$$

式中, R 为融合结果, W 、 S 、 O 分别代表水体、居民地和其他类别像素值, $NDVI$ 为归一化植被指数。

图 5(b) 为纹理复合 SVM 分类结果图,由该图可以看出,除了水体以外,西南部山体阴影部分也被作为水体信息提取出来了;图 5(d) 为消除了山地影响的效果图,由图 5(d) 可见,水体信息和实际情况比较相符,河流、坑塘在分类结果图上得到较准确的显示,但是穿过城区的河流部分仍难以准确地提取,究其原因是由于雷达图像本身特性和水体样本采集方面的原因造成的。

3.5 精度评价

为了评价研究区 SAR 图像的 SVM 分类精度,首先将 Landsat ETM+ 全色波段和多光谱数据进行融合,可得到分辨率为 15m 的假彩色合成图像,这个精度基本可以达到水体和居民地的目视解译要求,因此可以作为精度评价的参考图像;然后使用随机选点方式生成样本点 499 个,用于进行 SAR 分类结果的精度评价,其分类结果见表 1,居民地由于在 SAR 图像上的高亮特性,因此加上纹理信息后的分

表 1 纹理复合的 SAR 图像 SVM 分类精度评价

Tab 1 The accuracy evaluation of classification image using textural analysis based on SVM

类别名	参考点数	分类点数	正确点数	正确率 (%)
水体	27	25	21	84.00
其他	333	406	326	80.48
居民地	139	68	64	94.20
总数	499	499	411	

注:总体精度为 82.57%, Kappa 系数为 0.58

类精度可以达到 94.20%,水体分类精度可以达到 84.00%,而其他类分类精度为 80.48%。整个研究区图像分类精度为 82.57%, Kappa 系数为 0.58。分类之所以存在一定误差,主要是由于在水体和居民地信息提取过程中,存在少数散村、坑塘水体等的误提和漏提的缘故。

4 结论和讨论

(1) 由于单波段、单极化 SAR 图像具有较丰富的纹理信息,因此本文基于灰度共生矩阵提取其纹理结构信息,再将它和 SAR 图像复合生成多通道图像,可以有效地增强居民地和水体等专题内容,以弥补单通道 SAR 图像信息的匮乏和不足,从而为多云雨地区 SAR 图像快速获取水体和居民地信息提供支持,其对洪水灾害管理、环境监测及城市规划等领域具有重要的意义。

(2) SAR 图像加入纹理信息以后,斑点噪声对 SAR 图像分类具有减弱作用,其主要表现在分类结果的“椒盐现象”明显减少,这是因为 6×6 纹理提取窗口对图像具有一定的滤波作用,使原图像和纹理通道的复合形成多维空间,由于弱化了噪声的影响,从而有利于 SAR 图像专题信息提取;和目前使用较多的 MLC 法相比, SVM 法用于 SAR 信息提取具有较大优势,从图像定性分析来看, MLC 分类结果中,地物分布细碎,而 SVM 分类结果则多为面状分布,定性分析结果显示, SVM 的分类效果较好;本研究使用 SVM 进行水体、居民地和其他类信息提取,其分类精度分别达到 84.00%、94.20% 和 80.48%,总体分类精度达到 82.57%, Kappa 系数为 0.58。

SAR 图像分类由于受到地表特性、斑点噪声和

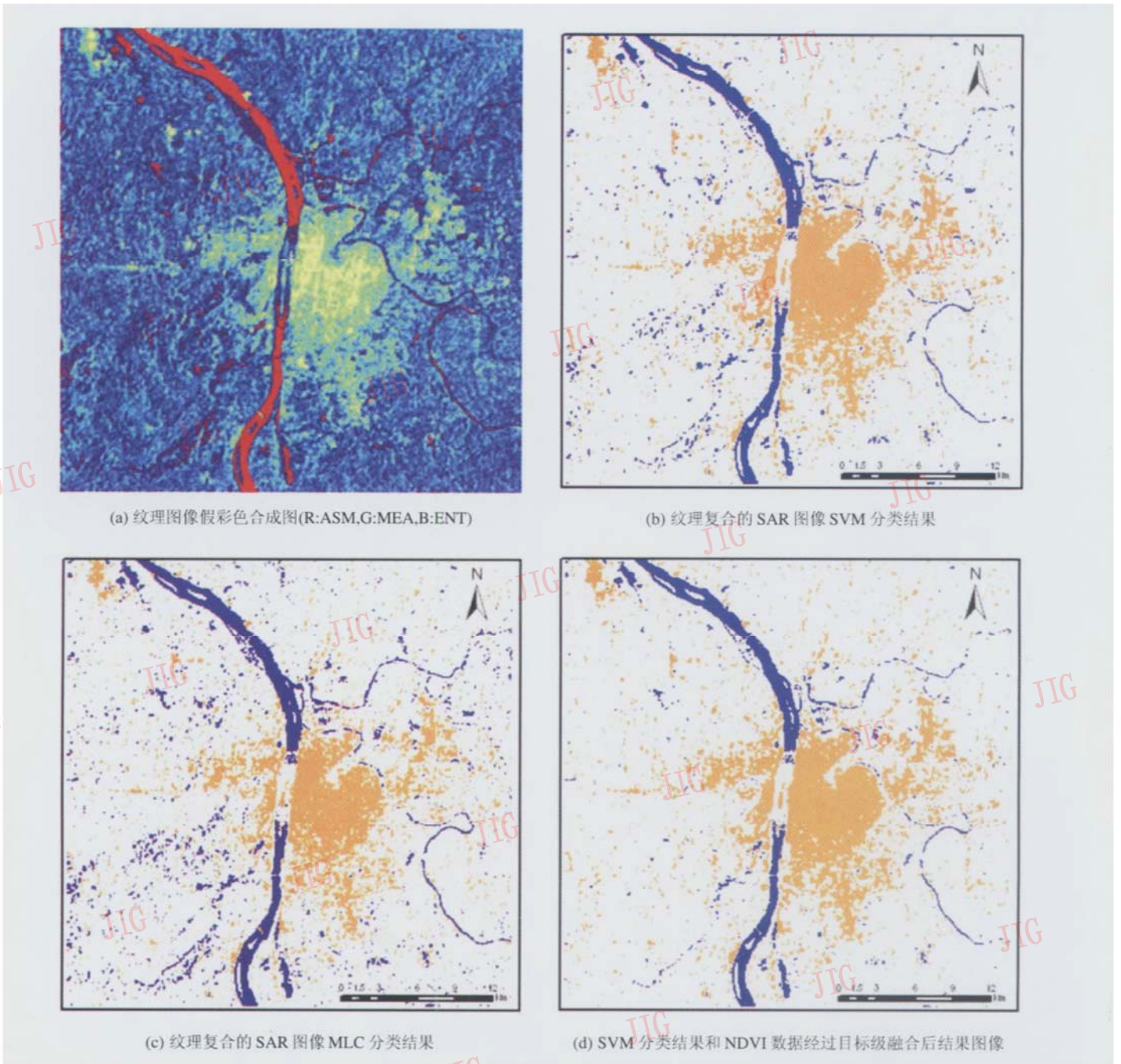


图 5 纹理图像假彩色合成图、SVM 和 SLC 分类结果以及目标层融合后结果图像

Fig 5 False colour composite image using textural channel, the classification image using SVM and MLC, the object-level fusion image

分类算法等方面的影响,致使水体和居民地信息提取还受到一定的限制,难以避免误分、误提的现象,比如机场之类的平坦地区,其较低的后向散射导致雷达影像难以和水体区别,还需要加入先验知识进行判别,以期进一步提高图像的分类精度。

参考文献 (References)

1 Yang Cun-jian, Zhou Cheng-hu, Wei Yim-ing *et al*. Enhancing the settlement information in SAR imagery [J]. Remote Sensing Technology and Application, 1998, 13(4): 5~ 8 [杨存建, 周成

虎, 魏一鸣等. 星载 SAR 图像中居民地专题信息增强的方法探讨 [J]. 遥感技术与应用, 1998, 13(4): 5~ 8]

2 Floyd M H, Xia Zong-guo. SAR application in human settlement detection, population estimation and urban landuse pattern analysis: a status report [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(1): 79~ 85

3 Ban Yifang. Improving the accuracy of synthetic aperture radar analysis for agricultural crop classification [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 1995, 21(2): 158~ 164

4 Fang Shen-hui, Zhu Wu. Classification of SAR using multipolarimetric and texture image [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2001, (10): 12~ 14 [方圣辉, 朱武. 辅以纹理特征的 SAR 图像分类

- 研究 [J]. 测绘通报, 2001, (10): 12~14]
- 5 Zhu Cai-ying, Lan Chao-zhen, Jin Guo-wang. Habitation area extraction by the method of intensity separation from SAR textured image [J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8(6): 616~619. [朱彩英, 蓝朝桢, 靳国旺. 纹理图像亮度阈值法提取 SAR 图像居民地 [J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(6): 616~619.]
 - 6 Hu Fu-yuan, Zhang Yan-ning, Xie Xiao-rong *et al*. A classification method for SAR image based on tree wavelet and gray-level co-occurrence matrix [J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(10): 1286~1288. [胡伏原, 张艳宁, 薛笑荣等. 基于树型小波和灰度共生矩阵的 SAR 图像分类 [J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(10): 1286~1288.]
 - 7 Ndi Youngui A, Tonye E, Akono A. Evaluation of speckle filtering and texture analysis methods for land cover classification from SAR images [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(9): 1895~1925.
 - 8 Dell'Acqua F, Gamba P, Trianni G. Semi-automatic choice of scale-dependent features for satellite SAR image classification [J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(4): 244~251.
 - 9 Gamba P, Dell'Acqua F. Increased accuracy multiband urban classification using a neuro-fuzzy classifier [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(4): 827~834.
 - 10 Tzeng Y C, Chen K S. A fuzzy neural network to SAR image classification [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(1): 301~307.
 - 11 Benz Ursula C. Supervised fuzzy analysis of single- and multichannel SAR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(2): 1023~1037.
 - 12 Zhou Cheng-hu, Luo Jian-cheng, Yang Xiaomei *et al*. Geo-understanding and Analysis for Remote Sensing Image [M]. Beijing: Science Press, 1999. [周成虎, 骆剑承, 杨晓梅等. 遥感影像地学理解与分析 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.]
 - 13 Raiesh K, Jawahar C V, Sengupta S *et al*. Performance analysis of textural features for characterization and classification of SAR images [J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(8): 1555~1569.
 - 14 Clausi David A. An analysis of co-occurrence texture statistics as a function of grey level quantization [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2002, 28(1): 45~62.
 - 15 Miranda F P, Fonseca L E N, Carr J R. Semi-variogram textural classification of JERS-1 (Fuyo-1) SAR data obtained over a flooded area of the Amazon rainforest [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(3): 549~556.
 - 16 Zhu Jun-jie, Guo Hua-dong, Fan Xiang-tao *et al*. The application of the wavelet texture method to the classification of single-band single-polarized and high-resolution SAR images [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2005, (2): 36~39. [朱俊杰, 郭华东, 范湘涛等. 单波段单极化高分辨率 SAR 图像纹理分类研究 [J]. 国土资源遥感, 2005, (2): 36~39.]
 - 17 Cortes C, Vapnik V. Support vector networks [J]. Machine Learning, 1995, 20(3): 273~297.
 - 18 Deng Nai-yang, Tian Ying-jie. Support Vector Machine: A New Method in Data Mining Field [M]. Beijing: Science Press, 2004. [邓乃扬, 田英杰. 数据挖掘中的新方法——支持向量机 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.]
 - 19 Angiulli G, Barrile V, Cacciola M. SAR imagery classification using multi-class support vector machines [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2005, 19(14): 1865~1872.
 - 20 Su Fu-liu, Ni Liang, Li Da-fang *et al*. Classification of SAR image based on gray co-occurrence matrix and support vector machine [A]. In: Proceedings of 2004 7th International Conference on Signal Processing [C], Harbin Institute of Technology, China, 2004, 2: 1385~1388.
 - 21 Krishnapuram B, Sichina J, Carin L. Physics-based detection of targets in SAR imagery using support vector machines [J]. IEEE Sensors Journal, 2003, 3(2): 147~157.
 - 22 Zhang Jin-shui, He Chun-yang, Pang Yao-zhong *et al*. The high spatial resolution RS image classification based on SVM method with the multi-source data [J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(1): 49~57. [张锦水, 何春阳, 潘耀忠等. 基于 SVM 的多源信息复合的高空间分辨率遥感数据分类研究 [J]. 遥感学报, 2006, 10(1): 49~57.]